第 37 卷第 11 期
2017 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.11
Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201603240531
张其春, 郗永勤.城市废弃物资源化共生网络:概念、特征及体系解析.生态学报,2017,37(11):3607-3618.
Zhang Q C,Xi Y Q.Symbiosis network for municipal waste recycling: concept, characteristics, and architecture analysis.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3607-3618.

城市废弃物资源化共生网络:概念、特征及体系解析

张其春[1,2,*], 郗永勤[1]
1 福州大学循环经济研究中心, 福州 350116
2 福建工程学院交通运输学院, 福州 350118

摘要:挖掘城市废弃物中有价值的资源,已经成为世界各国开展废弃物开发与管理的共同选择。产业共生是推动经济绿色发展和提高资源效率的战略工具,已经成为探讨废弃物资源化利用问题的重要视角。将产业共生理论引入城市废弃物资源化利用领域,提出城市废弃物资源化共生网络的概念,并将其典型特征概括为"四个统一",即价值网络与责任网络的统一,集聚共生与虚拟共生的统一,稳健型与脆弱性的统一以及自组织性与主体建构性的统一。借鉴超网络理论构建城市废弃物资源化共生网络体系的结构模型,并从共生单元、共生模式、共生界面和共生环境 4 个层面对该模型进行详细解析。城市废弃物资源化共生网络可分为核心网络和外围网络,两者之间存在全方位、多层次的合作机制。在城市废弃物资源化共生网络中,共生单元具有多层次性和多样性特征,它们之间存在着不同类型、效率各异的共生关系,推动共生模式向对称互惠一体化共生进化是破解城市废弃物资源化利用难题的关键;共生界面具有物质交换、能量传递、信息共享、知识传播及利益协调等多样化功能,而共生关系的进化以及共生界面功能发挥又依赖于优越的共生环境。此外,城市废弃物资源化共生网络有依托型、平等型、嵌套型和虚拟型等 4 种运作模式,国内典型案例分析表明这 4 种运作模式将长期并存。

关键词:城市废弃物;资源化利用;产业共生;产业共生网络;产业生态学

Symbiosis network for municipal waste recycling: concept, characteristics, and architecture analysis

ZHANG Qichun[1,2,*],XI Yongqin[1]
1 *Research Center for Circular Economy,Fuzhou University,Fuzhou* 350116,*China*
2 *School of Communication and Transportation,Fujian University of Technology,Fuzhou* 350118,*China*

Abstract: Mining valuable resources in municipal waste is often used to exploit and manage waste across the world. Industrial symbiosis is a strategic tool that can promote green economic development and improve resource efficiency, which has become important aspects of waste resource utilization. This study introduces industrial symbiosis theory to municipal waste resource recycling, promotes the concept of municipal waste recycling symbiosis network, and summarizes the typical characteristics of a municipal waste recycling symbiosis network into "four unifications". These are the unification of the value network and the responsibility network, unification of cluster symbiosis and virtual symbiosis, unification of robustness and vulnerability, and unification of self-organization and subject constructiveness. A theoretical model, based on super network theory, was built to architecturally analyze a municipal waste recycling symbiosis network. In order to gain a comprehensive understanding of the model, this study undertook a detailed analysis of the model using the symbiotic unit, the symbiotic mode, the symbiotic interface, and the symbiotic environment. The model suggests that the symbiosis network for municipal waste recycling can be divided into two networks: the core network and the peripheral network. The core

基金项目:国家自然科学基金项目(71573114);福建省社会科学规划项目(FJ2015C123);福建省软科学项目(2016R0002)
收稿日期:2016-03-24; **网络出版日期**:2017-02-22
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 47810989@qq.com

network consists of suppliers, recyclers, resource enterprises, and regeneration enterprises, whereas the peripheral network consists of governments, financial institutions, university research institutes, media outlets, industrial associations, and intermediary agencies. There is a comprehensive and multi-level cooperation mechanism between the two networks. Furthermore, the symbiotic unit is very diverse and has multi-level characteristics. There are different types of symbiotic relationships between symbiotic units with varying efficiency. Consequently, it is important to move primary symbiosis towards symmetric reciprocal and integrated symbiosis when attempting to solve municipal waste recycling problems. In the symbiosis network for municipal waste recycling, the symbiotic interface has material exchange, energy transfer, information sharing, knowledge dissemination, and interest coordination functions. The evolution of the symbiosis relationship and the functional efficiency of the symbiosis interface rely on a good quality symbiotic environment. In addition, there are four operation modes for a municipal waste recycling symbiosis network. These are the reliant, equal, nested, and virtual modes. A typical case analysis in China showed that these four operation modes coexist over the longer term.

Key Words: municipal waste; resource utilization; industrial symbiosis; industrial symbiosis network; industrial ecology

在自然资源日益枯竭的今天,以工业固体废弃物、废旧电器电子产品、建筑垃圾、生活垃圾等为主体的城市废弃物却与日俱增,总量已达到数千亿吨,并以每年百亿吨的速度增长,对人类社会的生存与发展造成了极大威胁。环境保护部《建设项目竣工环境保护验收技术规范生活垃圾填埋工程》编制组证实:我国已有约 2/3 的大中城市陷入垃圾包围中,1/4 左右城市无适合场所堆放垃圾[1]。如果不能对城市废弃物进行有效处理,最终将导致城市生态系统的崩溃,加快城市废弃物处理已经刻不容缓。

20 世纪 90 年代以来,城市废弃物资源化利用成为政产学研各界共同关注的热点问题,国内外学者从理论与实践、宏观与微观、定量与定性等不同角度开展了多层次的系统化研究,研究成果涵盖城市废弃物资源化利用的价值分析、潜力估算、影响因素及政策工具等众多方面[2-6],这些成果为深化该领域研究提供了宝贵资料。Laybourn 和 Lombardi 认为产业共生是推动经济绿色发展和提高资源效率的战略工具,已经成为探讨废弃物资源化利用问题的重要视角[7]。但现有研究主要聚焦于工农业废弃物的协同利用问题,较少拓展到城市废弃物资源化利用领域。随着产业共生理论与实践的发展,从共生的视域和范式开展城市废弃物资源化利用,具有很强的解释力和建构力。构建城市废弃物资源化共生网络的理论研究框架,可以为探索以城市废弃物为媒介的各类行为主体间的合作关系、机理和模式提供新的研究视角,为深化该领域的理论研究和实践发展注入新活力。

1 城市废弃物资源化共生网络概念的提出

联合国发布的《全球固体废弃物治理展望》指出:全球每年有 70—100 亿 t 固体废弃物产生,当前固体废弃物的资源化率不足 40%,仍有巨大的挖掘空间[8]。随着城市废弃物的激增,废弃物资源化利用已经成为破解资源与环境双重困境的重要途径,是实践绿色发展理念,加强生态文明建设的重要抓手。城市废弃物具有数量庞大性、分布分散性、类型多样性、成分复合型、性质复杂性和价值隐藏性等特征[8-9],对其资源化处理难度大,不仅需要强大的技术与设备支撑,还需要相关产业配套、有效的市场需求和公众的广泛参与[10]。为此,将城市废弃物纳入产业共生体系,推进生产系统与生活系统的循环链接,使城市废弃物资源化为其他产业的原材料,实现产业间的联动发展,成为解决城市废弃物难题的根本出路。

Graedel[11]最早提出"产业共生不应只包含工业共生"的观点,他认为应将产业共生拓展到产业所有领域。由于产业共生在提高副产品和废弃物的资源化率上表现突出,使得它与城市废弃物管理具有很高的契合性,为高效利用城市废弃物找到了理论依据。Shmelev 等[12]和 Wong 等[13]都认为城市废弃物资源化系统表现出很强的共生特性和网络特性,应当成为工、农业共生体系之外的另一主体。借鉴产业共生概念,Van Berkel 等最早将城市共生界定为:将城市范围内的各类废弃物资源化,作为企业生产的原料或能源的现象[14]。

Geng[15]和 Dong 等[16]也都认为产业共生活动应包含在城市共生范围内,城市共生能够促进当地工业企业创新城市废弃物再生利用方式,驱动城市废弃物管理与本地工业的共同发展,减少资源消耗和环境污染;Zhang 等[17]系统回顾了城市代谢的研究进展,认为通过物质与能量交换实现城市代谢与工业联动发展,有助于恢复城市生态平衡;刘光富等[18-19]认同"城市共生包含各种类型的产业共生"的观点,认为城市共生所资源化的废弃物包括一切可利用的废弃物,同时将城市共生的概念拓展到城市间的废弃物交换,即跨域共生。

由此可见,学术界普遍将各类行为主体围绕城市范围内的各类废弃物开展资源化活动所形成的共生关系定义为城市共生。按照上述界定,城市共生包含产业共生,其资源化对象涵盖产业废弃物和城市废弃物,覆盖范围太广,得出的结论难免笼统,无疑将弱化理论研究价值;且以产业废弃物为媒介所形成的产业共生网络研究已经取得了丰硕成果,现已形成较完善的理论体系[18,20-21],进一步深化研究的空间有限;此外,由于城市废弃物种类繁多,目前尚未形成囊括不同城市废弃物的城市共生现象,而以废旧电器电子、废旧汽车等为资源化对象的共生网络已经形成[19]。因此,本文提出"城市废弃物资源化共生网络"的概念,认为城市共生网络是产业共生网络和城市废弃物资源化共生网络的统一体(图 1)。其中,再生利用企业与其他行为主体间合作形成的各种共生关系是两者的交集,再生利用企业在城市共生网络运作中扮演着重要角色。

借鉴产业共生网络的概念[15],将城市废弃物资源化共生网络定义为:共生单元在一定的共生环境中,以城市废弃物为链接媒介,以价值共创共享、利益互惠互补、生态共护共荣为共生目标,以物质流、能量流、信息流、知识流和价值流协同运行为维系纽带,在彼此形成的共生界面上,按照一定的共生模式开展废弃物回收、拆解、加工、再生产、再制造及市场化等共生活动所形成的动态网络系统。这是一种城市废弃物资源化共生单元间合作的组织形态和功能模式,是资源综合利用和环境治理的行动联盟[22],其形成与运作过程不仅依赖于复杂系统的自组织性,更需要制度激励与政策引导,是内生性与建构性的统一体,反映了不同共生单元在获取经济价值的同时,对生态文明价值的崇高追求。

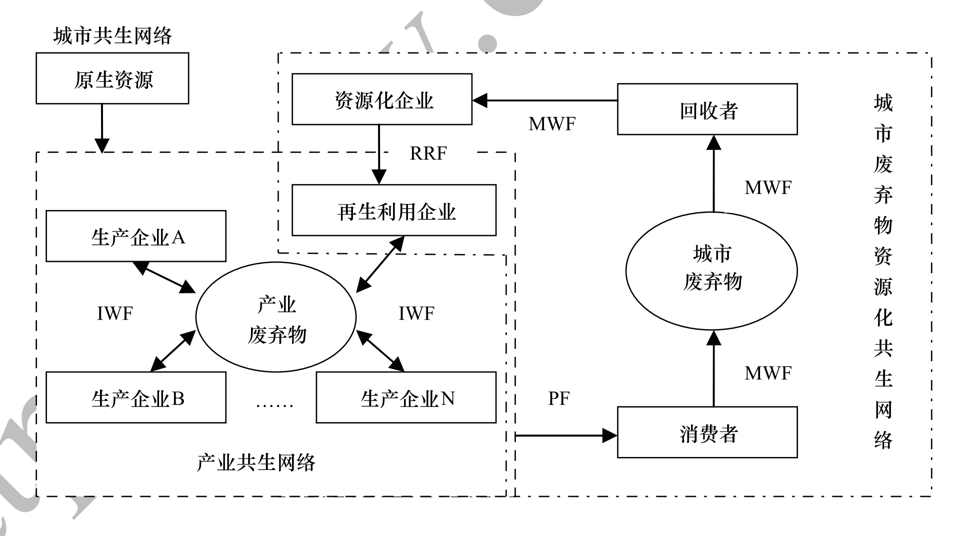


图 1　城市共生网络示意图

Fig.1　Schematic of municipal symbiosis network

IWF:产业废弃物物质流 Material flow of industrial wastes,MWF:城市废弃物物质流 Material flow of municipal wastes,PF:产品流 Product flow,RRF:再生资源物质流 Material flow of renewable resources

2　城市废弃物资源化共生网络的特征分析

由于城市废弃物的独特性,城市废弃物资源化共生网络和一般的产业共生网络相比,除了具有节点异质性、空间集聚性、系统耦合性、规模经济性、协同演化性、趋势虚拟化等方面的共性特征外,在涉及领域、网络范围、价值创造、交易规则、演化能力及信息结构等方面具有差异性(表 1),其典型特征可以概括为"四个统一"。

表 1 城市废弃物资源化共生网络与产业共生网络的比较

Table 1 Comparison of symbiosis networks for municipal waste recycling and industrial symbiosis network

比较维度 Comparative dimensions	城市废弃物资源化共生网络 Symbiosis network for municipal waste recycling	产业共生网络 Industrial symbiosis network
共生单元 Symbiotic unit	类型多样,涵盖消费者	类型较单一,生产型企业为主
链接媒介 Link medium	城市废弃物	工业废弃物、副产品等
价值创造 Value creation	多重性,外显价值和潜在价值	较单一,外显价值为主
产业链条 Industrial chain	多且长,侧重于强链、延链	多但短,强调建链、补链
网络范围 Network range	大,一般以城市为边界	小,一般以园区为边界
网络密度 Network density	低,网络关系较松散	高,网络关系紧密
网络弹性 Network resilience	刚性,重塑难度较大	柔性,可塑性强
交易频率 Trading frequency	高,共生单元间交易较稳定	较高,加入或退出壁垒高
复杂程度 Complexity	高,风险高	较低,风险小
演化能力 Evolution capability	演化速度慢,需要制度激励	演化速度较快,主要依靠市场机制
信息结构 Information structure	复杂,信息不对称程度高	较简单,透明度高

2.1 价值网络与责任网络的统一

城市废弃物资源化共生网络既是一个价值网络又是一个责任网络。城市废弃物资源化共生网络内各类行为主体具有明确的价值追求和责任担当,不同共生单元通过协调合作和共同行动,在追求各自经济效益的同时,兼顾社会效益和生态效益。虽然不同共生单元都有各自的利益诉求,但也存在共同的价值主张,具有共同的价值追求是形成共生体的动力源泉。从内在属性来看,这种共同的价值追求体现为生态价值,即对城市土壤、水体、气候等生态环境的治理和对各类原生资源的保护,充分体现了共生单元节约资源与保护环境的社会责任。每个共生单元既是自身经济价值增值的主张者又是生态价值实现的承担者,这种生态价值的实现以不损害各自的经济价值为前提,获得合理的经济利益是共生单元承担资源环境责任的前提,也是实现人与自然和谐共处的必要条件。共享利益和共担责任是城市废弃物资源化共生网络形成与发展的本质要求。因此,在城市废弃物资源化过程中必须做好利益与责任的合理分配,不断强化责任意识,形成对等的权责关系,以强烈的价值追求和责任精神共同应对资源环境危机。

2.2 集聚共生与虚拟共生的统一

城市废弃物资源化共生网络在空间上也呈现出集聚特征,在我国表现为向“城市矿产”示范基地集聚,但“城市矿产”示范基地只是网络核心区,由于其原料来源于终端消费者,中间产品(再生资源)又需要通过再生利用企业实现价值转移。因此,网络范围并不局限于“城市矿产”示范基地,而是拓展到整个城市,甚至跨越城市行政区划边界,形成以生态功能空间为依托的共生网络范围。也正因为如此,其网络密度较低,共生关系以点共生和间歇共生为主,高效率的共生关系难以形成,尤其是前端废弃物供给与回收环节更是如此。由于原材料的特殊性,共生单元加入或退出网络的门槛低,特别是回收、拆解等前端环节容易陷入无序的恶性竞争,造成二次污染。在新一代信息技术的支撑下,尤其是大数据时代的到来,城市废弃物资源化利用呈现虚拟化趋势,越来越多的企业依托互联网络交易平台,推广“互联网+回收”新模式[23],降低供给者与回收者之间的交易成本。各类共生单元之间也能利用互联网平台进行产业链整合,打破地域、资源、环境等限制,充分挖掘各共生单元优势,提高运作效率,实现跨域共生和虚拟化运营。在这样的背景下,城市废弃物资源化共生网络所覆盖范围往往不符合行政区边界,而是以生态功能完整性为特征而形成的功能性区域,在该生态功能区内不仅存在共生单元间的合作,也存在城际、府际间合作。

2.3 稳健性与脆弱性的统一

城市废弃物资源化共生网络是以城市废弃物的资源化利用为宗旨所形成的共生体,由于废弃物中蕴藏多样化的再生资源,如电子废弃物中可以分离出金、铁、镍、铜、锡等金属,还可以对不同材质的混合塑料进行分离,产生聚乙烯、聚苯乙烯、ABS 等通用塑料和工程塑料[24],以这些再生资源为原料形成更加丰富多样的再生

资源产业链。通过不断提高资源化效率,提取高质量、多样化的再生资源,实现对更多原生资源的替代,可以强化、延伸产业链。从这个层面来看,城市废弃物资源化共生网络具有较强的稳健性,某一细分产业链的衰败,对整体网络的影响有限,共生单元容易从其他领域打造出新的产业链,具有较强的自我修复功能和稳定性。然而,城市废弃物资源化共生网络演化升级受到资源化后端应用环节的强约束,即产业链后端对前端具有决定性影响,城市废弃物资源化产业链在很大程度上是一种引致型产业链[25]。因此,其网络弹性较差,一旦后端产业对再生资源需求萎缩或标准变更,将面临动荡、停滞甚至崩溃、瓦解的风险,如果缺乏强大的政策支持和突破性技术创新成果,共生网络重塑难度较大,具有明显的脆弱性。此外,共生单元间在市场、技术、政策等方面存在严重信息不对称,决定了共生价值难以实现均衡分配,共生单元间存在利益冲突,也暴露出共生关系的脆弱性。

2.4　自组织性与主体建构性的统一

由于城市废弃物种类繁多,共生单元节点多且分散,如果缺乏高效的交流机制,共生单元间将难以形成良性的互动互促态势,导致互惠共生和一体化共生等高效率共生模式缺失,共生网络的复杂程度较高。在这种情况下共生关系演化更多依靠由个人理性决定的自组织能力,而非共生单元集体理性决定的协同进化能力,演化速度较慢,难以适应复杂、动态的不确定环境。由于共生单元间存在各种利益冲突,在缺乏突破性技术创新和有效政策引导的条件下,共生网络演化容易受阻;而在突破性技术创新和政策激励的支撑下,能够激发共生网络的利益协调功能和相互促进功能,实现城市废弃物的深度开发,挖掘出品质更好、品种更丰富的再生资源,为下游企业提供高标准、高规格的原材料,促进共生网络向更有生命力的方向演化,实现共生网络价值的持续增值,体现出很强的主体建构性特征。当前,我国城市废弃物资源化共生网络正处于发展起步阶段,完全依靠网络内在自组织功能将难以应对城市废弃物暴增带来的环境压力,这就更需要各方的共同参与和集体行动[26],发挥政产学研用金介各方的力量,依靠协同治理解决城市废弃物暴增难题。由此可见,城市废弃物资源化共生网络具有自组织性和主体建构性双重特征,必须内外兼修方能推动持续升级。

3　城市废弃物资源化共生网络的结构体系解析

与一般的产业共生网络类似,城市废弃物资源化共生网络也是由共生单元、共生模式、共生界面和共生环境等四要素构成[27]。共生单元在相互的共生界面上通过某种共生模式形成共生关系,共生关系需要在特定的共生环境中产生、维持和升华;与此同时,共生单元之间在开展物质、能量、信息、知识及资金交换过程中,促进共生环境优化,优越的共生环境又反过来有助于共生网络价值增值,提升城市废弃物资源化利用水平。城市废弃物的供给者、回收者、资源化企业和再生利用企业等在网络形成与演化过程中扮演着不同角色,运行方式和目标取向也存在较大差异,属于异类共生单元节点,不适合将其置于同一网络加以分析。

超网络(Super network)是指网络中包含着网络的系统,是分析具有多主体、多层次、多属性及多准则复杂系统的有效工具[28]。城市废弃物资源化利用过程是一个具有多维异构关联属性的多网络联动运作过程,借助超网络不仅能够反映城市废弃物资源化共生网络中同类共生单元之间的交互关系,而且能够洞察不同共生单元之间的共生关系[29],有助于更清晰地把握共生网络内在结构、功能及进化机理。因此,借鉴超网络层次划分标准[30],针对城市废弃物资源化利用过程所表现出的复杂特征,结合不同共生主体间的相互作用,构建出城市废弃物资源化共生网络的概念模型(图 2),这是一个包含多种不同类型又相互关联共生主体的超网络模型。其中,供给者网络、回收者网络、资源化企业网络和再生利用企业网络属于同构、异质的关联网络,处于共生网络的内核,4 个子网络联动形成闭合回路,构成核心网络。即,将城市废弃物资源化过程抽象成一个 4 个子网络,网络节点是资源化过程的责任主体,同一网络节点间的实线表示共生单元间的共生关系,如资源化企业之间的实线可以表示废弃物调拨、联合开发资源化技术等;不同网络中的虚线表示异质主体间的共生关系,如供应者到回收者的连线可以表示废弃物的实物转移,也可以表示价值转移、双方信息沟通和知识传递等。政府部门、学研组织、金融机构、中介机构、行业协会及新闻媒体等外围主体构成了外围网络,核心网络和

外围网络共同形成一个相互联系、影响和融合的有机系统,核心网络与外围网络之间存在全方位、多层次合作机制,彼此之间的连线表示不同共生单元间的合作关系,如资源化企业与学研组织间的连线可以表示产学研协同创新,通过"双层"驱动的合作机制,推进城市废弃物资源化共生网络达到动态均衡。

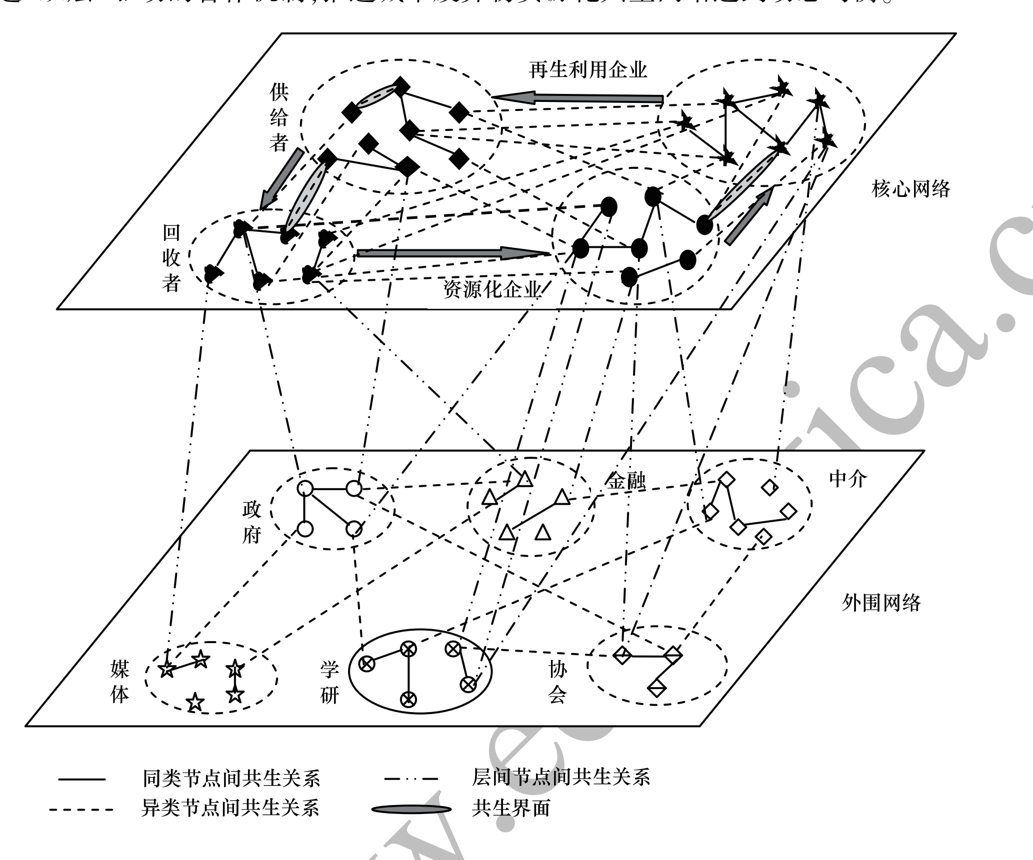


图 2 城市废弃物资源化共生网络的概念模型

Fig.2 Conceptual model of symbiosis network for municipal waste recycling

3.1 共生单元

共生单元是实施共生行为、形成共生关系、打造共生网络的基本能量生产、交换和分配单位。城市废弃物资源化共生网络是由多层次、多元化共生单元构成的复杂系统。Jofre[31]等指出,电子废弃物资源化过程是一个关联性很强的活动,各类行为主体必须协调合作才能保证系统的稳定,并认为应根据不同主体所扮演角色的重要性对其进行合理分类。从城市废弃物资源化过程来看,原生产品或再生产品被消费后丧失使用价值形成废弃物,废弃物回收后进行分拣、拆解、加工形成再生资源,再生资源经过再生产或再制造成为再生产品并销售给消费者使用。该过程中供应者、回收者、资源化企业和再生利用企业之间存在上下游关系,具有天然的互补性,处于共生网络的内核,是城市废弃物资源化共生网络的核心共生单元,它们之间的本质关系是资源供需关系,理想状态是达到供需匹配。这些共生单元的行为活动构成了闭路循环,也成为以城市废弃物为媒介形成的共生关系区别于一般产业共生的关键。而政府部门、学研组织、金融机构、中介机构、行业协会及新闻媒体等并不直接参与到城市废弃物的资源化过程中,而是发挥服务功能,要么直接支持核心共生单元的业务开展,要么通过优化共生环境间接影响核心共生单元行为。这些共生单元处于共生网络的外围,发挥着不可或缺的激励、协调、宣传或引导等功能,对核心共生关系的形成与演化起到重要的推动作用,属于辅助共生单元。核心共生单元的不断进化也将倒逼辅助共生单元提升自身能力,使彼此能够协同进化,共同推动共生网络演化升级。

在城市废弃物资源化共生网络中,每类共生单元都由具有不同性质、特征或功能的行为主体构成,每类行为主体又都存在大量的个体,它们构成了城市废弃物资源化共生网络的共生单元节点。共生单元具有"能动

性”和“互动性”双重特性。“能动性”体现为共生单元具有自组织的内生功能,可以自行演化而优化其功能和结构,但自演化速度慢,难以适应外界复杂环境的变化。“互动性”则体现为共生单元之间可以通过合作实现协同进化,加速共生网络能量扩充,这种“互动性”一方面取决于共生单元间的质参量关联,只要存在质参量兼容特征就能够生成共生关系[32],产生共生能量,促使共生单元间形成互促共演的态势;另一方面也受共生环境的影响,尤其需要依托制度建设和政策引导,激发共生单元的共生动力。共生单元的培育是打造城市废弃物资源化共生网络的首要任务,共生单元的多层次性和多样性决定了实现共生单元能力的匹配进化是一项复杂而艰巨的任务,加大了共生单元培育的难度。

3.2　共生模式

共生模式是共生单元间的相互作用方式或合作形式,具体反映共生单元间的物质、能量、信息、知识和资金的交换关系,是共生关系维系与升华的载体。共生模式的价值在于使共生单元相互适应、相互激发,实现共同进化,使共生网络能量得以合理整合和有效提升。城市废弃物资源化共生网络的共生模式是指各类共生单元之间的物质流、能量流、信息流、知识流和价值流的生成、交换、配置和进化的具体形式。在城市废弃物资源化共生网络中,同时存在着同类共生单元内部主体间的共生关系和异类共生单元间的共生关系。前者如,消费者之间开展废弃物销售价格、渠道等方面信息的交流及行为习惯的相互影响,回收者之间在信息平台、设施、技术等方面实现资源共建共享,学研组织针对资源化技术开展合作创新,各级政府及其部门开展城市垃圾问题的联合执法和跨界治理等。然而,这种共生关系对城市废弃物资源化共生网络形成与演化的影响较小,属于弱共生关系,不是本研究的重点,不再展开分析。异类共生单元间的共生模式反映了异类共生单元间的作用方式和作用强度,在很大程度上决定了共生效率和共生网络能量。

3.2.1　共生行为模式

共生行为模式反映共生单元之间的行为交互方式,揭示了共生现象的形成与演变特征,包括寄生、偏利共生、非对称互惠共生和对称互惠共生等 4 种形式[27],4 种共生模式下的共生效率依次递增。由于城市废弃物资源化共生网络内各共生单元都是独立的利益实体,具有自主决定共生与否的权利。因此,形成共生关系的前提是互利共赢。寄生和偏利共生都是只利于单边进化,在城市废弃物资源化共生网络等经济社会网络中一般不存在。互惠共生存在双向的利益交流机制,可以产生共生价值,从而形成共生网络进化的驱动力,是共生关系持久稳定的保障。虽然对称互惠共生依托公平的利益分配机制,能够获得匹配的进化能力,其共生效率最高、共生价值最大,能够持续促进共生网络价值增值,但由于各共生单元在能力、分工、责任及文化等方面存在差异,又受到市场结构、政府政策、社会规范等外部因素的影响,共生单元之间在能力、地位、信息等存在明显不对称,不可能完全对等地开展合作并实现利益的平均分配。因此,共生单元之间更多以非对称互惠共生形式存在。这种不对称的能量交换关系和利益分配机制导致共生单元无法同步进化,将造成共生单元之间的能力不匹配,阻碍共生网络演化升级。

在实际运作过程中,内核共生单元的资源化企业和再生利用企业由于具有技术、人才、规模、政策等方面的优势,在共生过程中处于主导地位,往往能够获得超额的利润;而消费者和回收者则处于被动地位,削弱了他们参与共生网络建设的积极性。辅助共生单元中的中介机构、学研组织和金融机构等往往以契约形式与内核共生单元建立合作关系,受资源稀缺性和市场竞争不充分的影响,在合作过程中处于优势地位,也能够获得更多利益;而政府、行业协会、新闻媒体等主要发挥支持、引导作用,更多考虑社会效益和生态效益,其实际工作效果常常低于预期水平。非对称互惠共生下的共生网络处于非均衡状态,当共生单元利益分配不平衡达到一定阀值,就会引发利益冲突,导致共生网络震荡、停滞甚至萎缩、崩溃,具有先天脆弱性。随着市场竞争的日益充分,系统开放程度和信息透明度不断提高,共生单元间的共生关系将由非对称互惠共生逐渐向对称互惠共生进化。

3.2.2　共生组织模式

共生组织模式反映了共生单元间联系紧密程度的差异,包括点共生、间歇共生、连续共生和一体化共生等

4 种形式[27],很显然这是根据共生行为持续时间长短进行划分的,4 种共生模式下的共生效率依次递增。在城市废弃物资源化共生网络中,这 4 种共生模式同时并存,只是在共生网络生命周期的不同阶段,主导模式会发生改变。在形成期以点共生为主,发展期以间歇共生和连续共生为主,而成熟期则呈现高度的一体化共生。一体化共生如果不适应复杂动态的外部环境,将进入衰退和蜕变阶段。从我国城市废弃物资源化利用领域的合作情况来看,各类共生单元间的共生关系日益密切,连续性、一体化共生现象日益增多,模式也日趋多样且新颖,共生效率不断提高。但由于我国城市废弃物资源化利用仍然处于起步阶段,还存在不少思想观念和体制机制障碍,扼杀了共生单元开展共生创新的动力,点共生和间歇共生仍然是共生单元间开展合作的主要形式。这种松散型的低层次共生模式,导致共生单元能量得不到充分交换和释放,无法适应技术、市场、制度和环境的变化,共生网络的层次和水平难以得到有效提升,集聚效应和品牌效应仍有较大挖掘空间。推动共生模式不断向对称互惠一体化共生进化,破解城市废弃物资源化利用难题,创造新的价值空间。

3.3 共生界面

共生界面是共生单元之间开展共生活动时的接触方式和机制,或者说是共生单元之间建立联系的媒介、通道或载体,是共生关系形成与演化的基础[27],具有物质交换、能量传递、信息共享、知识传播及利益协调等多样化功能,物质、能量、信息、知识及资金等是共生界面功能得以实现的共生介质,共生单元之间正是依靠共生介质的交换实现共同进化。共生界面功能的发挥程度取决于共生介质的优劣,共生介质越优异,共生单元间交流与合作就越顺畅,优异的共生介质在很大程度上决定了共生关系稳定性和持续性,是共生网络效率提升的重要保障。很显然,物质、能量、信息、知识及资金等共生介质可以分为有形介质和无形介质,物质、资金属于有形介质,能量、信息和知识属于无形介质,共生单元在共生界面上开展共生活动的介质往往是多样化的,具有高度融合特征,依靠组合介质完成共生活动。城市废弃物资源化共生网络中共生关系的广泛性决定了其共生界面存在的多样性,可以说共生界面存在于任意两个具有相互关联的共生单元节点之间。由于共生单元节点间建立联系的途径和方式不同,共生界面也有丰富的表现形式。根据共生界面依赖的共生介质差异,城市废弃物资源化共生网络的共生界面可归结为物质交换机制、能量传递机制、信息共享机制、知识传播机制和利益协调机制。在城市废弃物资源化共生网络运作过程中,这五种共生界面都将发挥重要作用,只是在不同的共生活动中,其功能发挥程度不同,存在主导界面与辅助界面之分。

3.4 共生环境

共生环境是共生关系及共生模式产生、维系及升华的外部条件,是共生单位以外的各种资源要素的综合。优越的环境有助于城市废弃物资源化共生网络的形成与演化,通过也不断与共生单元开展物质、能量、信息、知识等交换,增强共生单元的实力及其相互间合作的稳定性;而共生网络的良性运作也会产生积极的外部效应,推动共生环境的优化。共生单元与共生环境的动态匹配是共生网络发展的必然要求。按照共生环境对共生网络施加影响的方向,可将共生环境划分为正向环境、中性环境和反向环境。为促进共生网络的良性发展,必须不断强化正向效应,遏制负面影响,通过优化共生环境提升共生单元间的合作水平、层次和效率,促进共生关系向对称互惠一体化共生演进。城市废弃物资源化共生网络的共生环境主要包括生态环境、政策法律环境、经济环境、社会环境、技术环境和空间环境等,这些环境要素具有系统性、关联性和外部性特征,能够对共生单元起到引导、激励、保护或协调作用,共生环境的不断优化有助于打造以生态文明建设为宗旨的生态功能空间。

4 城市废弃物资源化共生网络的运作模式

产业共生网络在运作模式上可以划分为 4 种类型:依托型、平等型、嵌套型和虚拟型[33]。网络权力是网络交换和协调过程中不同网络节点的控制能力和影响能力[34],不同运作模式主要是依据网络权力配置的差异划分的。城市废弃物资源化共生网络虽然是一种特殊的产业共生网络,但其运作模式也有这 4 种类型,其结构如图 3—图 6 所示。由于目前我国城市废弃物资源化共生网络尚处于形成和发展阶段,其运作模式以依

托型与平等型为主。

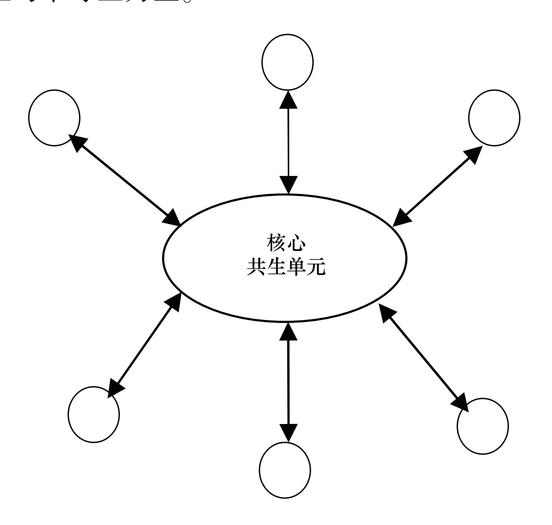


图 3　依托型城市废弃物资源化共生网络示意图

Fig.3　Schematic of reliant symbiosis network for municipal waste recycling

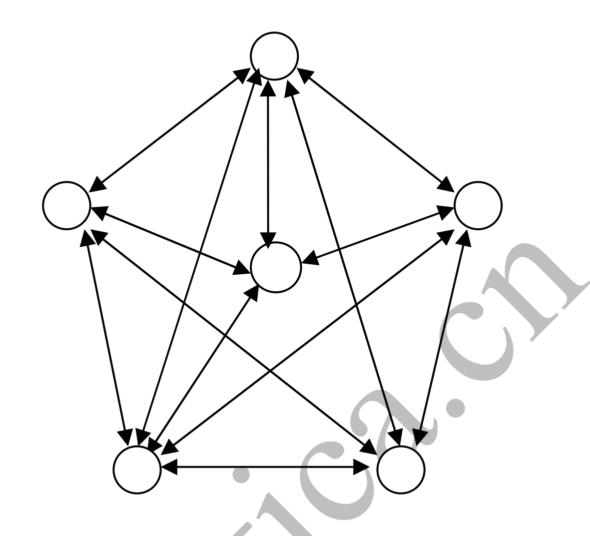


图 4　平等型城市废弃物资源化共生网络示意图

Fig.4　Schematic of equal symbiosis network for municipal waste recycling

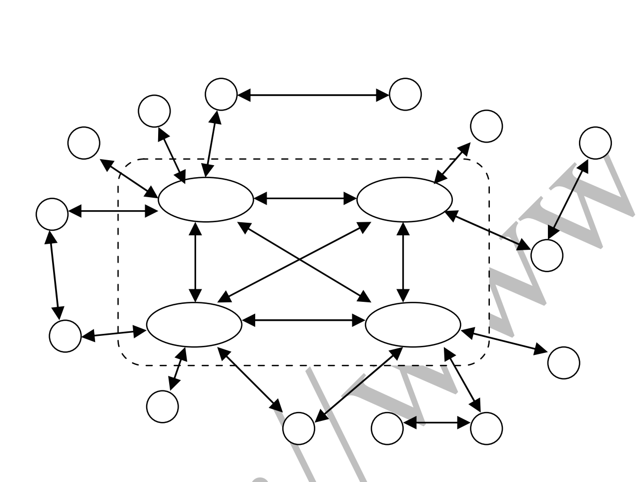


图 5　嵌套型城市废弃物资源化共生网络示意图

Fig.5　Schematic of nested symbiosis network for municipal waste recycling

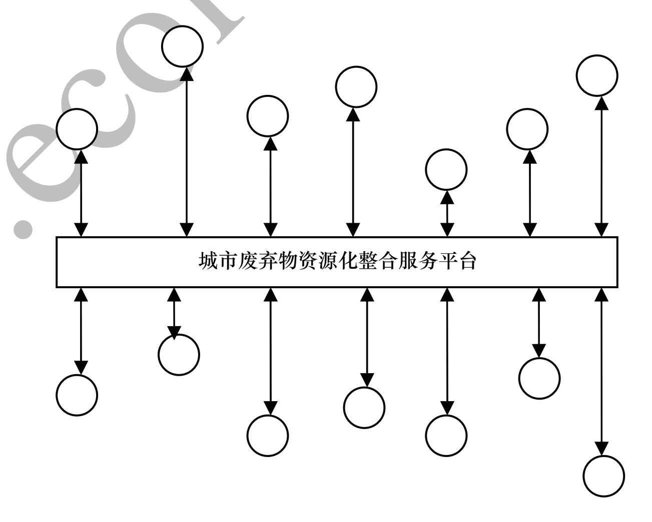


图 6　虚拟型城市废弃物资源化共生网络示意图

Fig.6　Schematic of virtual symbiosis network for municipal waste recycling

4.1　依托型城市废弃物资源化共生网络

依托型共生网络是最基本和最广泛采用的运作模式,其本质是众多中小共生单元依附于一家或几家核心共生单元开展共生活动(图 3),根据核心共生单元的数量可分为单中心和多中心两种类型。以武汉格林美"城市矿产"循环产业园为核心区而形成的共生网络是单中心依托型城市废弃物资源化共生网络的典型代表。格林美是网络权力的主导者,以格林美为核心,吸引众多的中小企业集聚,为其提供回收、流通、检测、研发、销售及金融等各项服务,核心共生单元与众多依附共生单元依靠业务关系形成强共生关系。在这种共生网络中,核心共生单元通常是资源化企业,其他企业或组织处于从属地位。核心共生单元在业务谈判和网络治理中处于绝对主导地位,依附共生单元对核心共生单元具有强依赖性,这种网络权力配置方式往往使资源向核心共生单元集聚,加剧信息不对称,导致共生利益分配不对等。核心共生单元对共生网络具有高度控制力,很大程度上决定了共生网络的稳定性和安全性。外部环境变迁和自身经营能力的变化都将造成核心共生

单元的经营波动,而一旦核心共生单元经营陷入困境,无疑对依附共生单元的生存造成决定性影响,造成共生网络的震荡、萎缩甚至瓦解,共生风险高。为避免核心共生单元经营变更的影响,依附共生单元往往采取分散合作方式,同时与多家核心企业合作,从而驱动网络组织模式不断向更高层次进化。

4.2 平等型城市废弃物资源化共生网络

平等型共生网络中各节点间处于对等地位,节点之间依靠市场机制维持网络运作,节点间具有大致相同的网络权力(图 4)。以广东清远华清循环经济园为核心区形成的共生网络是平等型城市废弃物资源化共生网络的典型代表。共生单元之间不存在依附关系,在合作过程中处于相对平等地位,由于不存在网络主导者,网络权力配置比较对称,能够较合理地分配共生利益。各共生单元节点之间依靠市场机制,开展物质、信息、资金等相互交流活动形成松散型网络,共生网络内节点多,且每个共生单元往往与不同企业建立共生关系,共生单元对共生伙伴的选择权较大,彼此间的共生关系较弱,当共生单元之间的交易不能为其中一方带来利益时,共生关系就会瓦解。但是,由于共生单元具有自我修复功能,单个或部分共生节点或连接失效,并不会对整个共生网络造成太大影响,整体网络具有一定的稳健性。然而,由于这种共生网络内共生单元的实力都比较一般,难以获得规模效应,也无法取得重大技术突破,市场竞争能力普遍较弱,共生环境变化对这种产业共生网络的影响很大。此外,这种共生网络的合作关系以利益为纽带,共生单元容易实施盲目发展、过度竞争等短视战略,造成恶性竞争和二次污染,需要政府和园区加强日常监管,避免陷入经营危机。

4.3 嵌套型城市废弃资源化共生网络

嵌套型共生网络是一种复杂的网络组织模式,兼具依托型和平等型共生网络的优点,通常是由多家核心共生单元与其吸附共生单元通过各种业务关系而形成的彼此联动、相互嵌套、相互融合的多中心嵌套网络结构模式(图 5)。以天津子牙循环经济产业区为核心区所形成的共生网络是嵌套型城市废弃物资源化共生网络的典型代表。这种共生网络通常有多家主导企业,主导企业往往分属于不同的细分领域,主导企业具有很强的集聚效应,吸引配套企业入驻,形成高度的产业集聚现象。在天津子牙循环经济产业区内,TCL 奥博公司、天津国联等是网络权力的主导者,它们分别属于废旧家电和报废汽车两条资源化产业链的链主,链主企业之间通过水、能量、信息、资金、技术和人才等交流共享建立共生关系,形成主体网络,主体网络在整个共生网络中处于核心地位,也是网络权力配置的主体,如图 5 中的虚线框所示。此外,链主企业还吸引了 280 多家产业链上下游企业进驻,编织出多重子网络,形成了“静脉串联”、“动脉衔接”、产业间“动态循环”的循环经济发展“子牙模式”,这种模式的本质是所有共生单元之间围绕各类废弃物,依托物质流、能量流、信息流、知识流和价值流的相互交织、相互渗透、层层嵌套,形成复杂的共生网络综合体。由于共生界面更加多元顺畅,共生单元间的交流渠道更加便捷,共生关系更加牢固,各共生单元依托共生网络强大的价值整合能力,实现价值在共生网络节点间的合理配置,有助于形成对称互惠一体化共生。这种共生网络具有更高能级和影响力,是一种高层次、高水平的产业共生网络,能够保障共生网络的稳健性和持续升级。然而,这种共生网络也是由核心共生单元主导,核心共生单元一旦出现经营危机也将造成共生网络的震荡,只是多元的核心共生单元可以创造更多的共生关系,某个核心共生单元的退出或部分共生网络的瓦解对整体共生网络的影响有限,共生单元更容易依靠断键重连的机制和择优选择的机理[35],重新获得与其他企业的共生机会。

4.4 虚拟型城市废弃物资源化共生网络

虚拟型共生网络是一种新颖的组织模式,突破了传统的地理界限和具体的物质交换,依靠移动互联网、云计算、大数据、物联网等新一代信息技术,依托信息流交换实现企业间的物质流、能量流、知识流和价值流的连接,形成开放式的动态网络联盟。依托江苏“e 环保 · 易回收”平台而形成的共生网络是虚拟型城市废弃物资源化共生网络的典型代表。以“e 环保 · 易回收”微信平台为纽带,实现城市废弃物供给者和回收者的有机结合,进而将回收、分拣后的废弃物提供给省内有资质的相关资源化企业,达到线上回收和线下处置融为一体,这些企业在空间上并不存在集聚性,形成了虚拟式网络组织。由于城市废弃物具有分布分散、种类繁多等特征,且不少废弃物资源化企业和再生利用企业都是由传统企业转型而来,这些企业往往位于不同地理位置,如

果集中向特定工业园区转移、集聚,势必要花费大量的迁移成本。虚拟型城市废弃物资源化共生网络是一种以信息为链接纽带,以城市废弃物为合作媒介,能够充分发挥不同企业的核心能力,达到优势互补、协同工作的组织模式,适应了将分散、繁多的城市废弃物予以资源化的现实需求,日益受到产业界的青睐。在这种运作模式中,"互联网+分类回收"平台扮演着主导者角色,依托大数据平台,各类共生单元能够获得所需的原料和副产品的数量、种类、成本等基本信息,据此建立共生合作关系,并依靠现代化的高效物流突破地理空间限制,保障共生网络的良性运作。在信息化平台缺少的条件下,共生单元间的共生关系将无法形成,而信息化平台具有门槛低和边际收益递增特征,能够吸引更多的共生单元加入,丰富网络结构,提高城市废弃物资源化共生网络的开放性、适应性和延展性。

然而,江苏"e 环保 · 易回收"虽然服务于产业链上的众多企业,但目前也仅实现了产业链前端环节的有效衔接,尚未拓展到废弃物资源化和再生利用等后端环节。格林美的"回收哥"和桑德回收联盟也借助 O2O 方式,利用线上的手机 APP、微信、网站和线下回收箱相结合,试水"互联网+分类回收"模式,并已经取得了一定成效,但这些回收平台也仅仅是企业进行产业链延伸的创新形式。随着回收体系的不断完善,回收的废弃物种类和数量将呈现爆炸式增长,远远超过企业自身的消化能力,回收后的废弃物将更多地提供给其他有资质的资源化企业。"互联网+分类回收"平台也将衍化成废弃物资源化整合服务平台,实现从废弃物回收、拆解、加工、再生产、再制造及市场化等各个环节的全程产业链优化,形成虚拟型共生网络。这种共生网络具有很大的灵活性,能够有效降低土地成本和搬迁成本,但这种模式的信息成本和物流成本较高,也不利于技术装备的升级、土地的节约集约高效利用、水的循环利用、能源的梯级利用、基础设施的共建共享以及运行管理的规范化,推高了运营成本,这也是我国之所以极力打造"城市矿产"示范基地,推动产业集聚化发展的重要原因。即便"互联网+分类回收"模式成熟运作,虚拟型共生网络也仅仅是城市废弃物资源化共生网络的辅助模式,不可能替代其他类型的运作模式,而其他 3 种运作模式却能够从"互联网+分类回收"中受益,使共生网络愈加高效、稳定而持久。因此,城市废弃物资源化共生网络将呈现有形网络和虚拟网络长期并存的格局。

5　结论与展望

随着我国"城市矿产"开发工作的快速推进,现有理论研究成果已经不能满足产业发展的现实需求,理论落后于实践的弊端凸显。因此,需要在现有研究成果的基础上,从系统性、关联性、动态性和普适性等方面寻求新的突破。本文将共生理论引入城市废弃物资源化领域,在厘清产业共生网络、城市共生网络与城市废弃物资源化共生网络之间关系的基础上,提出城市废弃物资源化共生网络的概念,并将其特征归纳为"四个统一"。然后,从超网络视角构建城市废弃物资源化共生网络的系统构成及各层网络之间的关联性,通过各个网络节点间的关联,更深入地洞察共生网络内部结构,从共生单元、共生模式、共生界面和共生环境解析城市废弃物资源化共生网络体系,并利用国内典型案例对 4 种运行模式进行解释,为开展城市废弃物资源化利用问题研究提供了新的视角和探索思路。从该体系入手,可进一步开展城市废弃物资源化共生网络形成问题、共生网络演化升级机理、共生网络单元角色定位和利益协调、共生网络效率评价与提升、共生网络脆弱性诊断与治理以及不同共生网络的异质性问题等方面的理论与实证研究,为我国大规模开展城市废弃物资源化利用提供理论依据和决策支持。

参考文献(References):

[1] 张迪, 孟航. "垃圾围城"困境如何破?. 中国城市报, 2015-07-13(14).

[2] Cossu R, Williams I D. Urban mining: concepts, terminology, challenges. Waste Management, 2015, 45: 1-3.

[3] Li J H, Zeng X L, Huisingh D. Urban mining for resource supply and its role in sustainable industry. 2015. http://www.cleanerproductionconference.com/resources/updateable/pdf/Urban mining.pdf.

[4] Wen Z G, Zhang C K, Ji X L, Xue Y Y. Urban mining's potential to relieve China's coming resource crisis. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(6): 1091-1102.

[5] Zeng X L, Gong R Y, Chen W Q, Li J H. Uncovering the recycling potential of "New" WEEE in China. Environmental Science & Technology,

2016, 50(3): 1347-1358.
[6] 王昶, 徐尖, 姚海琳. 城市矿产理论研究综述. 资源科学, 2014, 36(8): 1618-1625.
[7] Laybourn P, Lombardi D R. Industrial symbiosis in European policy. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(1): 11-12.
[8] The International Solid Waste Association. Global Waste Management Outlook. 2015. http://iswa2015.org/global-waste-management-outlook.
[9] 余福茂. 电子废弃物回收管理理论与政策: 利益相关主体回收行为分析的视角. 杭州: 浙江大学出版社, 2014: 2-3.
[10] Laner D, Rechberger H, De Soete W, De Meester S, Astrup T F. Resource recovery from residual household waste: an application of exergy flow analysis and exergetic life cycle assessment. Waste Management, 2015, 46: 653-667.
[11] Graedel T E, Allenby B R. 产业生态学. 施涵, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[12] Shmelev S E, Powell J R. Ecological-economic modelling for strategic regional waste management systems. Ecological Economics, 2006, 59(1): 115-130.
[13] Wong L F, Fujita T, Xu K Q. Evaluation of regional bioenergy recovery by local methane fermentation thermal recycling systems. Waste Management, 2008, 28(11): 2259-2270.
[14] Van Berkel R, Fujita T, Hashimoto S, Geng Y. Industrial and urban symbiosis in Japan: analysis of the eco-town program 1997-2006. Journal of Environmental Management, 2009, 90(3): 1554-1556.
[15] Geng Y, Tsuyoshi F, Chen X D. Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: a case study of Kawasaki. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(10-11): 993-1000.
[16] Dong L, Fujita T, Dai M, Geng Y, Ren J Z, Fujii M, Wang Y, Ohnishi S. Towards preventative eco-industrial development: an industrial and urban symbiosis case in one typical industrial city in China. Journal of Cleaner Production, 2015, 114: 387-400.
[17] Zhang Y, Yang Z F, Yu X Y. Urban metabolism: a review of current knowledge and directions for future study. Environmental Science & Technology, 2015, 49(19): 11247-11263.
[18] 刘光富, 鲁圣鹏, 李雪芹. 产业共生研究综述: 废弃物资源化协同处理视角. 管理评论, 2014, 26(5): 149-160.
[19] 刘光富, 鲁圣鹏, 李雪芹, 陈洋琴. 废弃物资源化城市共生网络形成模式研究. 科技进步与对策, 2014, 31(12): 36-40.
[20] Boons F, Spekkink W, Mouzakitis Y. Erratum to "The dynamics of industrial symbiosis: a proposal for a conceptual framework based upon a comprehensive literature review". Journal of Cleaner Production, 2011, 19(15): 1773-1776.
[21] Lombardi D R, Lyons D, Shi H, Agarwal A. Industrial symbiosis: testing the boundaries and advancing knowledge. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(1): 2-7.
[22] Zucaro A, Ripa M, Mellino S, Ascione M, Ulgiati S. Urban resource use and environmental performance indicators. An application of decomposition analysis. Ecological Indicators, 2014, 47: 16-25.
[23] Fei F, Qu L L, Wen Z G, Xue Y Y, Zhang H N. How to integrate the informal recycling system into municipal solid waste management in developing countries: based on a China's case in Suzhou urban area. Resources, Conservation and Recycling, 2016, 110: 74-86.
[24] Sun Z, Xiao Y P, Agterhuis H, Sietsma J, Yang Y X. Recycling of metals from urban mines – a strategic evaluation. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2977-2987.
[25] 陶长琪, 周璇. 产业融合下的产业结构优化升级效应分析——基于信息产业与制造业耦联的实证研究. 产业经济研究, 2015, (3): 21-31, 110-110.
[26] 王玉明. 城市群环境共同体: 概念、特征及形成逻辑. 北京行政学院学报, 2015, (5): 19-27.
[27] 袁纯清. 共生理论——兼论小型经济. 北京: 经济科学出版社, 1998.
[28] 王众托, 王志平. 超网络初探. 管理学报, 2008, 5(1): 1-8.
[29] 张其春, 郗永勤. 基于"四链"协同升级的战略性新兴产业发展研究——以我国稀土产业为例. 当代财经, 2015, (5): 86-96.
[30] 席运江, 党延忠. 基于加权超网络模型的知识网络鲁棒性分析及应用. 系统工程理论与实践, 2007, 27(4): 134-140, 159-159.
[31] Jofre S, Morioka T. Waste management of electric and electronic equipment: comparative analysis end-of-life strategies. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2005, 7(1): 24-32.
[32] Mirata M, Emtairah T. Industrial symbiosis networks and the contribution to environmental innovation: the case of the Landskrona industrial symbiosis programme. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(10-11): 993-1002.
[33] 王兆华. 生态工业园工业共生网络研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
[34] Sozen H C. Social networks and power in organizations: a research on the roles and positions of the junior level secretaries in an organizational network. Personnel Review, 2012, 41(4): 487-512.
[35] 冯锋, 王亮. 产学研合作创新网络培育机制分析—基于小世界网络模型. 中国软科学, 2008, (11): 82-86, 95-95.